

Ahorro energético residencial en ciudades de zonas áridas. Incorporación de cubiertas vegetadas como estrategias ambientalmente eficientes.

Residential energy saving in arid cities. Environmentally efficient strategies with green roofs incorporation.

Juan Emiliano Flores Asin *
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) / Consejo
Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET)
eflores@mendoza-conicet.gob.ar

Claudia Fernanda Martinez **
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) / Consejo
Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET)
cmartinez@mendoza-conicet.gob.ar

María Alicia Cantón ***
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) / Consejo
Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET)
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

Erica Norma Correa ****
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) / Consejo
Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET)
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

Fecha de envío: 23-02-2016 | Fecha de aceptación: 24-04-2016 | Fecha de publicación: DICIEMBRE 2017



Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 internacional

* Juan Emiliano Flores Asin. De profesión Ingeniero Agrónomo por la Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ciencias Agrarias. Ha trabajado en el sector privado y en otras dependencias del estado nacional. Se ha desempeñado como docente universitario y actualmente desarrolla su ejercicio profesional como Becario doctoral de CONICET, con el tema de investigación "Cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas. Diseño y evaluación del desempeño energético-ambiental". Actualmente cursa su Doctorado en Ciencias-Universidad Nacional de Salta.

** Claudia Fernanda Martinez. De profesión Ingeniera Agrónoma por la Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ciencias Agrarias, Doctor en Ciencias Biológicas con orientación en Ecología -PROBIOL- Universidad Nacional de Cuyo. Actualmente desarrolla su ejercicio profesional como Investigadora Adjunta de CONICET, con el tema de investigación "Bosque urbano en zonas áridas: biomonitorio ambiental de estrés hídrico y contaminación. El caso del Área Metropolitana de Mendoza"

*** María Alicia Cantón. De profesión Arquitecta por la Universidad Mendoza - Facultad de Arquitectura y Urbanismo, DEA en Arquitectura por la Universidad de Mendoza. Actualmente desarrolla su ejercicio profesional como Investigadora Independiente de CONICET, con el tema de investigación "Impacto energético-ambiental de los espacios urbanos y edificios en ciudades emplazadas en zonas áridas. Diseño eficiente y nuevas tecnologías".

**** Erica Norma Correa. De profesión Ingeniera Química por la Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Mendoza, Doctora en Ciencias - Área Energías Renovables por la Universidad Nacional de Salta. Actualmente desarrolla su ejercicio profesional como Investigadora Independiente de CONICET - INAHE, con el tema de investigación "Sustentabilidad energética y ambiental del diseño urbano. Eficiencia de las estrategias de mitigación de la isla de calor en ciudades de clima árido".

Resumen

La adopción de estructuras vegetadas no tradicionales en ciudades de zonas áridas, -nuevas tecnologías como cubiertas y muros verdes- constituye estrategias que permiten el control de temperaturas interiores extremas durante el verano, que a escala urbana favorecen la mitigación del fenómeno Isla de Calor Urbana. Este trabajo analiza la incidencia de dos especies incorporadas a cubiertas vegetadas y adaptadas a condiciones de déficit hídrico -*Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile*-, sobre la eficiencia térmica de espacios interiores. El desempeño térmico ha sido monitoreado durante verano e invierno en box experimentales. Los resultados muestran que las cubiertas vegetadas reducen la temperatura interior 1,6°C en verano con un consecuente ahorro energético para refrigeración del 30-35%. En invierno dicho ahorro es del 2-4% en horario diurno. Estos resultados indican la importancia de evaluar nuevas tecnologías verdes en términos de diseños adaptados localmente, de modo de maximizar su eficiencia energética y garantizar la sustentabilidad urbano-edilicio.

Palabras clave: Techos verdes; Comportamiento térmico; Ahorro energético; Zonas áridas

Abstract

The adoption of non-traditional green structures in arid cities -new technologies such as green roofs and green walls- constitutes an strategies that controls the indoor high temperatures in summer at building scale, and mitigates the urban heat island at urban scale. This work evaluates the effect of green roofs with adapted species to water deficit -*Aptenia cordifolia* and *Sedum spectabile*- on the thermal efficiency of indoor spaces. The thermal performance during summer and winter has monitored in experimental boxes. The results indicate that in the green roofs, indoor summer temperature decreases 1,6 °C, this generate an energy saving for refrigeration of 30 to 35%. In winter, diurnal energy saving of 2-4% is observed. This data indicate that the design of these new technologies should be assessed at local level to maximize energy efficiency and ensure urban-building sustainability.

Keywords: Green Roofs; Thermal Behavior; Energy Saving; Arid Cities

Introducción

En ciudades de elevada antropización, el sellamiento de suelos, el uso de materiales inadecuados en envolventes edilicias y el calor generado por motores de combustión, principalmente, ocasionan una diferencia de temperatura entre el espacio urbano y el espacio circundante no urbano, que se denomina Isla de Calor Urbana (ICU) (Alchapar N. & Correa, E. 2013). El aumento de temperatura en zonas urbanas derivado del fenómeno de ICU provoca un mayor consumo energético destinado a refrigeración para el acondicionamiento térmico de edificios. El uso eficiente de la energía es uno de los pilares de la sostenibilidad urbana en ciudades consolidadas y la aplicación de políticas para tal fin tiene suma relevancia en un contexto de aumento de su demanda debido al crecimiento económico e industrial y a mayores exigencias de habitabilidad (Rosenfeld E. et al., 2007; Cárdenas, G. J. 2011).

La incorporación de estrategias de mitigación del efecto de ICU, en un contexto de planificación urbana, colaborará a que la temperatura en las ciudades se aproxime al rango de confort para el ser humano, evitando que luego se deba consumir mayor cantidad de energía para contrarrestar este fenómeno. La valoración de la sustentabilidad urbana deja de manifiesto el rol de la vegetación (Pincetl S., 2012), ya que la misma puede reducir las temperaturas urbanas de 0,5 a 4,0 °C (Qiu G. et al. 2013). Una de las principales estrategias de mitigación de ICU es la incorporación de espacios verdes en vacíos urbanos a través de parques, plazas, arbolado de alineación vial, patios y nuevas tecnologías como muros y techos vegetados. Las nuevas tecnologías verdes, permiten la incorporación de vegetación a envolventes edilicias en ciudades consolidadas donde no se cuenta con vacíos urbanos disponibles para otro tipo de estructura verde tradicional. Estudios previos han demostrado que dependiendo del clima de la región y de la cantidad de vegetación, la economía de energía que generan estas tecnologías, varía entre un 35-95% (Alexandri E. & Jones P. 2006).

A nivel internacional, la incorporación de nuevas tecnologías verdes está en auge, ya que impac-

ta en la reducción de los efectos del calentamiento global, la contaminación atmosférica y el nivel de ruidos, como también en la disminución del efecto de la ICU y en el acondicionamiento térmico edilicio, con la consecuente disminución de los consumos de energía (Dunnet N. & Kingsbury N. 2004; Wong N. H., Tan A. Y., Tan P. Y. & Wong N. C. 2009). Si bien en Europa y América del Norte estas tecnologías ya están siendo aplicadas, su incorporación a los contextos locales se encuentra aún en fase de experimentación.

En Argentina, el interés por estas tecnologías se ha incrementado desde el año 2013 con la aprobación de la Ley N°4.428. Esta ley tiene por objeto la implementación de "Techos o Terrazas Verdes" en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Dicha ley menciona que los propietarios de edificaciones que implementen y mantengan techos verdes, gozarán de una reducción de hasta el 20% las tasas de alumbrado, barrido y limpieza. Tal estímulo promueve el uso de la tecnología y colabora al metabolismo urbano trayendo grandes beneficios a nivel urbano. Sin embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño termo-energético en la zona.

En particular, a nivel local la mayor parte del territorio de la provincia de Mendoza se ubica integrando el mosaico mundial de las Zonas Áridas. La incorporación de vegetación en estas zonas presenta condicionantes específicas: alta insolación y amplitud térmica; baja precipitación y humedad relativa. Por ende, el mantenimiento de espacios verdes depende del aporte artificial de agua mediante riego.

En el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) resultados de mediciones en prototipos experimentales indican que en espacios interiores a la cubierta vegetada, disminuciones de temperatura de 1,5 a 1,6 °C generarían ahorros de energía eléctrica destinada a refrigeración del orden del 32% al 34% en la estación de verano (Flores Asin J. E., Martínez C. F., Cantón M. A. & Correa E. N. 2015). Otros autores han evaluado el comportamiento térmico de las cubiertas vegetadas en la estación invierno determinan-

do que la temperatura en el sustrato es 7 a 8 °C más elevada que la temperatura alcanzada en cubiertas tradicionales y sus consecuentes ahorros energéticos destinados a calefacción (Teemusk A. & Mander U. 2010).

Para el AMM, emplazada en un contexto árido, se plantea la necesidad de avanzar en el estudio y desarrollo de sistemas de naturación urbana que empleen especies de bajo consumo hídrico, y que permitan un apropiado acondicionamiento térmico. El potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes es elevado en la alta densidad constructiva de la ciudad capital -61%- (Flores Asin J. E., Martínez C. F. & Cantón M. A. 2013). La aplicación de estas tecnologías -con adaptación a restricciones hídricas- permitiría incorporar masa vegetal al espacio urbano-edilicio y contribuiría al ahorro energético.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de cubiertas vegetadas en el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético, en verano e invierno en zonas de clima cálido-seco.




Metodología

1. Diseño experimental

El diseño experimental sigue la metodología propuesta por (La Roche P. 2009) y tiene por objeto analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas tradicionales y de cubiertas vegetadas adaptadas a los condicionantes locales, sobre el comportamiento térmico de espacios interiores. A tal fin, en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (latitud 32°53'52.83"S, longitud 68°52'31.30"O) se montaron tres box de ensayo: un box testigo con cubierta tradicional sin vegetar (CT) y dos box con cubiertas vegetadas con distintos paquetes biológicos (denominadas CV1 y CV2).

Los box de ensayo conforman volúmenes ciegos de 1 m³, de carácter liviano y aislado al exterior. Tecnológicamente, muros y pisos están compuestos por tres capas: placa cementicia en la cara interior (espesor 10 mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor 50 mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor 18 mm), acabado esmalte sintético color blanco. La cubierta es de hormigón armado (espesor 150 mm; peso específico 2400 Kg/m³; dosificación en volumen: 1-3-3 cemento, árido grueso y fino, aislada hidráulicamente (membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt). Ésta última, tiene por objeto evaluar el tipo constructivo comúnmente empleado en la resolución de techos en el parque edilicio del AMM.

Figura 1: Diseño Experimental.

		Cubierta vegetada <i>Aptenia cordifolia</i> (CV1)	Cubierta vegetada <i>Sedum spectabile</i> (CV2)	Cubierta testigo (CT)
Características de las especies vegetales evaluadas.				
Cobertura (%)	Verano	76,10	79,00	-
	Invierno	80,99	19,70	-
Consumo hídrico (litros.m ² /año)		268	291	-
Hábito de crecimiento		Rastrero	Erguida	-

Fuente : Figura realizada por el autor.

La cubierta vegetada está definida por un manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo, un sistema de riego por goteo subsuperficial, sacos de geotextil (3) contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor 150 mm) y las especies vegetales. En este trabajo se evalúan dos especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant. "baby rose" y *Sedum spectabile* (Boreau) H. Ohba "sedum de otoño" (Figura 1).

2. Método de medición

El diseño experimental tiene por objeto el desarrollo y monitoreo térmico de ensayos en condiciones controladas. El comportamiento térmico se evalúa a partir del registro de temperaturas -exterior e interiores- en las estaciones de verano e invierno durante periodos de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos mediante microadquisidores de datos en la siguiente configuración: un sensor fijo del tipo Onset® HOBO® temp/RH logger UX100-003 en el espacio interior del box, dos sensores en la losa de hormigón -cara interna y externa- del tipo termocupla T EL-USB-TC con data logger incluido en cada una; y un sensor de referencia en el espacio abierto (Figura 2).

El cálculo de la demanda térmica se realiza mediante el método de grados-hora desarrollado por (Erbs D. G. 1987).

Resultados

1. Selección de los días de análisis

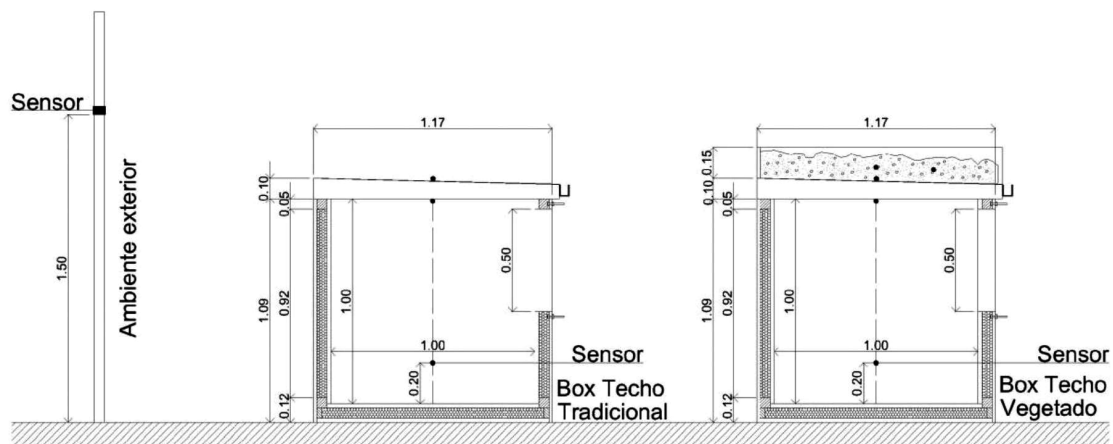
1.1 Verano: Dentro de los 24 días que corresponden período de medición, para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético se consideraron 9 días típicos de verano (Figura 3), los cuales se presentan soleados, con una temperatura media de 26,07 °C (media histórica periodo de verano serie temporal de los años 1983 – 2014 de 24,36 °C) y una media de flujo de radiación de 709,1 W/m² - mínima 659,8 W/m², máxima de 739,7 W/m²-(amplitud 79,8 W/m²).

Invierno: Para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético en invierno, dentro de los 24 días del período de medición, se han considerado 12 días típicos (Figura 4). Dichos días se presentaron totalmente soleados con una temperatura media de 8,40 °C (media histórica periodo de invierno serie temporal de los años 1983 – 2014 de 8,90 °C) y una media de flujo de radiación de 456,4 W/m² -mínima 433,3 W/m², máxima 476,0 W/m²- (amplitud 42,7 W/m²).

2. Comportamiento térmico

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres tratamientos CT, CV1 y CV2 en torno a su comportamiento térmico y

Figura 2: Distribución de sensores de temperatura.



Fuente: Elaboración propia

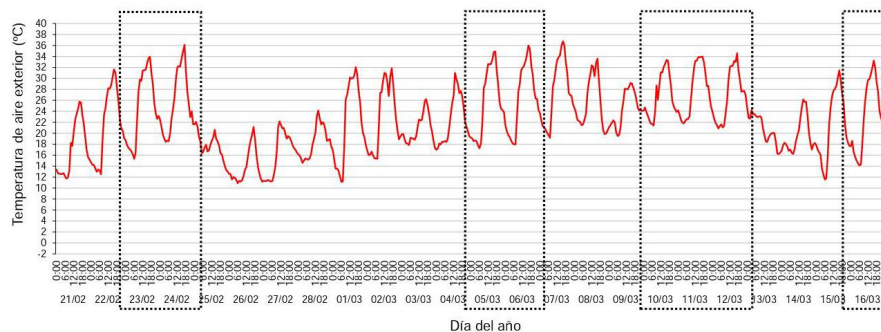
al potencial ahorro energético que implicaría su implementación masiva en áreas urbanizadas con clima local. Los datos fueron promediados en forma horaria para una mejor comprensión de los comportamientos globales.

2.1 Verano: Los valores de temperatura exterior en el ciclo de medición oscilaron en un rango comprendido entre 10,90 a 36,80 °C. La temperatura en el interior del box testigo -con cubierta tradicional- presenta una oscilación térmica de comportamiento similar aunque desfasada a la exterior con un máximo de 37,90 °C y un mínimo de 12,20 °C. En cambio, la temperatura en espacios conexos a cubiertas vegetadas presenta un rango de variabilidad de 14,50 a 31,80 °C (Figura 5). Se puede observar que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra desfasada con respecto a la temperatura exterior debido a la masa térmica de la envolvente de los mismos. En días despejados, las temperaturas máximas

y mínimas del box testigo -CT- son superiores a las exteriores en todo el ciclo de medición debido al efecto de ganancia solar y al carácter conservativo resultante de la aislación de muros y pisos que limita la capacidad de enfriamiento del espacio interior durante la noche. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo.

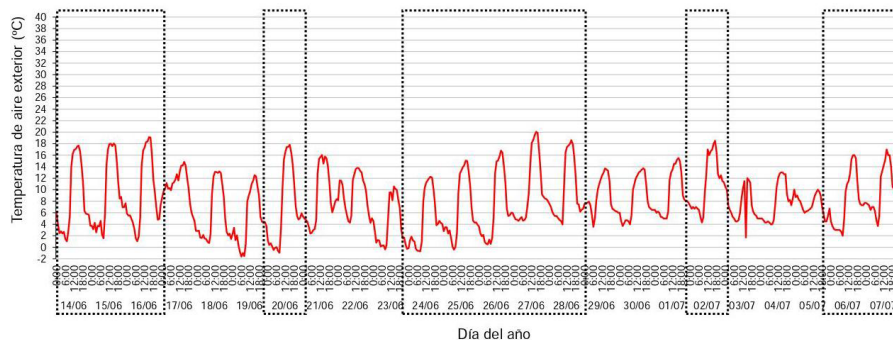
Para los días típicos de verano, la temperatura máxima exterior es similar a la interior en el box CT (35 °C) y muestra diferencias de 5,0 °C respecto a CV1 y CV2. La temperatura media exterior es semejante a CV1 y CV2, y menor respecto al tratamiento CT (1,8 °C). Las temperaturas mínimas en los box son superiores a la exterior debido al efecto de amortiguamiento térmico de la envolvente. Este efecto se acentúa en los tratamientos con cubierta vegetada, alcanzando diferencias respecto a la temperatura exterior de 4,6 °C. En consecuencia, se observa que los tra-

Figura 3. Periodo de medición estación VERANO.



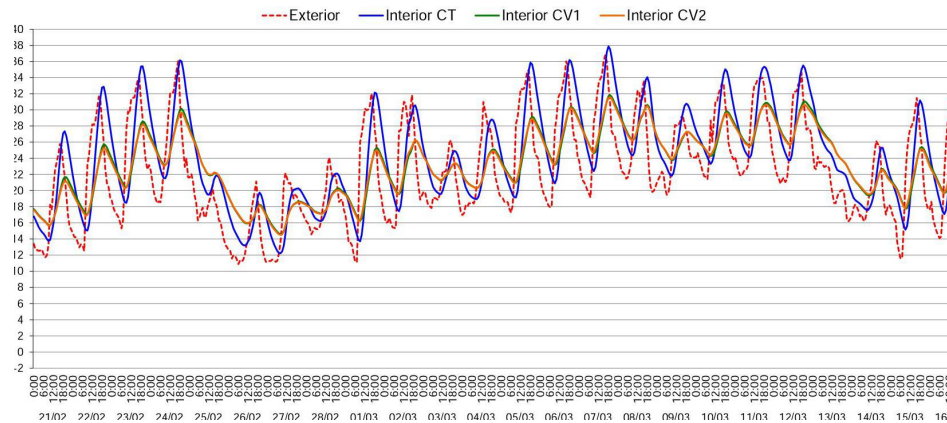
Fuente : Elaboración propia

Figura 4. Periodo de medición estación INVIERNO.



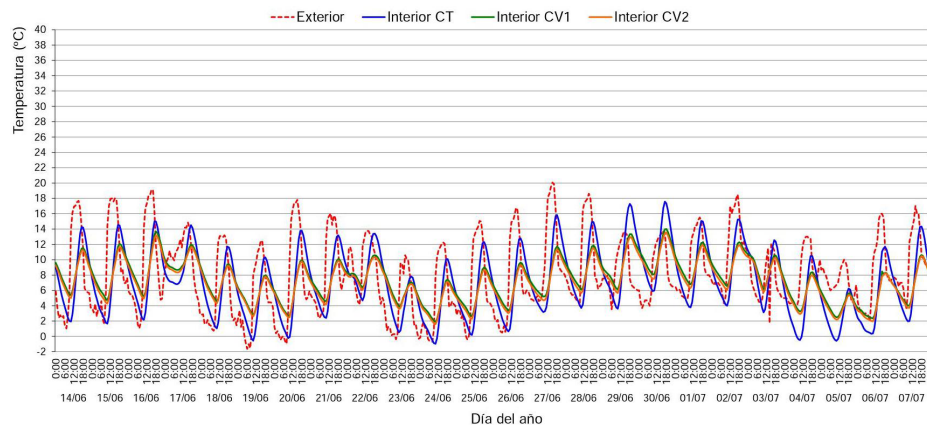
Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Temperatura exterior e interior en la estación de VERANO



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Temperatura exterior e interior en la estación de INVIERNO



Fuente : Elaboración propia

tamientos con tecnología verde amortiguan la amplitud térmica notablemente (6 a 7 °C). Este efecto amortiguador es claramente observable en relación al box testigo cuya amplitud térmica es de 14,4 °C.

2.2 Invierno: Los valores de temperatura exterior en el ciclo de medición oscilaron en un rango comprendido entre -1,62 °C a 20,06 °C. La temperatura en el interior del box testigo -CT- presenta una oscilación térmica menor a la exterior (18,53 °C) con un máximo de 17,57 °C y un mínimo de -0,96 °C. En cambio, la temperatura en espacios conexos a cubiertas vegetadas presenta un rango de variabilidad de 1,60 °C a 14,02 °C (Figura 6). Queda de manifiesto al igual que en la estación de verano que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra des-

fasada con respecto a la temperatura exterior. En días despejados, las temperaturas máximas del box testigo -CT- son inferiores a las exteriores en todo el ciclo de medición debido a la baja intensidad de radiación consecuencia de la altitud solar y la inercia de la losa de hormigón. Las temperaturas mínimas del box CT se encuentran por debajo de las temperaturas mínimas exteriores debido al efecto de la membrana que actúa como un material selectivo frío. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo debido a las características intrínsecas a la tecnología verde.

Al analizar los días típicos de invierno, se observa que la temperatura máxima exterior es mayor en 3,8 °C a la interior en el box CT, en cambio

para las cubiertas vegetadas las temperaturas máximas interiores son menores respecto a la exterior en un valor de 6,6 °C a 6,9 °C, para CV1 y CV2 respectivamente. La temperatura media interior del box CT es menor a la exterior en 1,4 °C, en cambio para el box CV1 esa diferencia es de 1,2 °C y para CV2 es de 1,6 °C. La temperatura mínima presenta valores cercanos en el exterior (1,7 °C) como en el interior del box CT (1,6 °C). En cambio, los casos CV2 y CV1 presentan mínimas de 3,8 a 4,2 °C superior al box CT, respectivamente. Estos resultados demuestran que las temperaturas mínimas medias son superiores en 2,2 a 2,6 °C con cubiertas vegetadas respecto a una cubierta tradicional, lo que demuestra su mejora en términos de transferencia de calor en la cubierta como parte de la envolvente, dotándola de características conservativas respecto a la energía en espacios interiores. La temperatura exterior presenta una amplitud térmica media

de 15,5 °C. Al observar las amplitudes térmicas medias interiores se observa una diferencia de 3,3 °C entre el box CT respecto a la exterior. En cambio la amplitud térmica registrada en el interior de los box CV1 y CV2 es menor a la exterior y está en el orden de los 6,5 °C, en comparación a los 15,5 °C de la temperatura exterior. Esto demuestra la eficiencia del poder aislante de las cubiertas vegetadas como también se observó en la estación de verano (Tabla 1).

3. Potencial de ahorro energético

3.1. Verano: En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior para los 9 días de análisis alcanza valores de 27,83 °C en CT, 26,28 °C en CV1 y 26,21 °C en CV2. En todos los casos, dichas temperaturas se encuentran por encima de la temperatura de confort -23 °C- (Tabla 2). Los box CV1 y CV2 presentan una diferencia en-

Tabla 1: Temperaturas medias exteriores e interiores para los 9 días de análisis en la estación de VERANO

Temperatura (°C)		Exterior	Interior		
			CT	CV1	CV2
	Máx.	34,76	35,61	29,93	29,63
	Med.	26,07	27,83	26,28	26,21
	Mín.	18,48	21,19	23,06	23,05
	ΔT	16,28	14,42	06,87	06,58

Fuente : Elaboración propia

Tabla 2: Temperaturas medias exteriores e interiores para los 12 días de análisis en la estación de INVIERNO

Temperatura (°C)		Exterior	Interior		
			CT	CV1	CV2
	Máx.	17,24	13,74	10,68	10,38
	Med.	08,45	07,01	07,21	06,88
	Mín.	01,72	01,56	04,18	03,81
	ΔT	15,52	12,18	06,50	06,57

Fuente : Elaboración propia

Tabla 3: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	24,77	26,31	24,15	24,03	2,15	2,28
2	25,63	28,15	26,37	26,16	1,78	1,99
3	25,70	26,39	24,57	24,57	1,82	1,82
4	26,47	28,23	26,69	26,71	1,53	1,52
5	27,58	29,63	28,11	28,13	1,52	1,51
6	26,77	28,43	26,75	26,77	1,68	1,65
7	27,75	29,48	28,11	28,02	1,38	1,47
8	26,81	29,34	28,42	28,20	0,92	1,14
9	23,13	24,54	23,37	23,30	1,17	1,24
Promedio	26,07	27,83	26,28	26,21	1,55	1,62

Fuente : Tabla realizada por el autor.

tre temperaturas medias del orden de 1,5 °C y 1,6 °C respecto al testigo (Tabla 3). Esto se debe al efecto de las cubiertas vegetadas en las temperaturas medias interiores. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

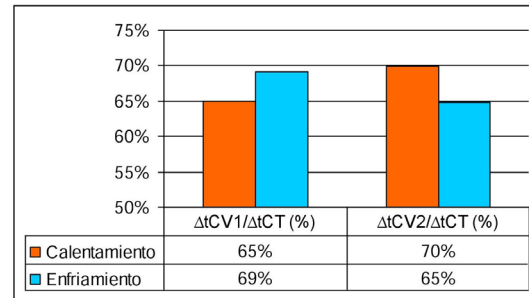
Análisis hora-hora para el periodo de calentamiento y de enfriamiento

Con el fin de analizar comparativamente el comportamiento térmico y su consecuente ahorro energético en función de cada tratamiento y de la termofase del día, ya sea calentamiento o enfriamiento, se han realizado los cálculos correspondientes a los mismos.

La determinación del consumo energético derivado de la necesidad de enfriamiento o de calentamiento, se realiza mediante el cálculo de las diferencias de temperatura hora a hora para cada termofase (temperatura de confort 23 °C). Dichos valores fueron calculados para los 9 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura hora a hora para cada periodo permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT- (Tabla 4).

Los resultados muestran que variaciones interiores de temperatura del orden de 1,25 °C generan ahorros de energía del 65% para CV1 en el periodo de calentamiento y variaciones de 1,76 °C generan ahorros de energía del 69% durante el enfriamiento (Tabla 4, Figura 7). En cambio para CV2, variaciones interiores de temperatura del orden de 1,08 °C generan ahorros de energía del

Figura 7. Consumo energético (%) de CV1 y CV2 relativo a CT en VERANO



Fuente: Elaboración propia

70% en el periodo de calentamiento y variaciones de 2,01 °C generan ahorros de energía del 65% durante el enfriamiento. De estos resultados se concluye que, aunque con pequeñas diferencias, el tratamiento CV1 demuestra ser más eficiente durante la noche y el tratamiento CV2 durante el día.

El consumo energético, respecto al testigo (CT), muestra un consumo del 65% para el tratamiento CV1 y del 70% para CV2 para el periodo de calentamiento. En cambio, para el periodo de enfriamiento se puede observar –contrario al calentamiento– que el box CV1 (69%) presenta mayor eficiencia que el box CV2 (65%), lo que se debe a las características intrínsecas de cada especie vegetal (Figura 7). El consumo energético diferencial por especie y por periodo podría explicarse por lo siguiente: el hábito rastrero y compacto de la especie *Aptenia cordifolia* utilizada en CV1 podría permitir la llegada de mayor cantidad de flujo radiativo solar que *Sedum spectabile* en CV2, y permitiendo una mayor transferencia térmica por conducción, menor eficiencia de día (mayor ganancia) como

Tabla 4. Promedio de temperaturas horarias por termofase en días típicos de VERANO. Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2.

	T (°C) exterior	T (°C) interior			Δt interior = CT-CV		$\Sigma \Delta t_{CT}$ (°C)	$\Sigma \Delta t_{CV1}$ (°C)	$\Sigma \Delta t_{CV2}$ (°C)
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2			
Calentamiento	30,31	26,58	25,33	25,50	1,25	1,08	322,25	209,53	225,05
Enfriamiento	23,03	28,73	26,96	26,72	1,76	2,01	721,81	499,46	468,18
							Σ 1044,06	708,99	693,23

Fuente: Elaboración propia

de noche (mayor capacidad de enfriamiento) respecto a *Sedum spectabile* que presenta hábito arbustivo y una condición abierta. Su morfología posibilitaría menor ganancia diurna por sombreado de la cubierta y menor intercambio radiativo y convectivo hacia la bóveda celeste debido a su porte arbustivo, dificultando el enfriamiento nocturno.

3.2. Invierno: En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior para los 12 días de análisis alcanza valores de 7,05 °C en CT, 7,11 °C en CV1 y 6,77 °C en CV2. En todos los casos, dichas temperaturas se encuentran por debajo de la temperatura de confort para la estación -18 °C- (Tabla 5). Los box CV1 y CV2 respecto

al testigo presentan diferencias mínimas entre temperaturas medias del orden de 0,06 °C y 0,28 °C, respectivamente. Lo que indica que ambas cubiertas vegetadas presentan temperaturas medias similares a las del box CT. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

Análisis hora-hora para el periodo de calentamiento y de enfriamiento

Los consumos energéticos han sido determinados con el mismo criterio que para la estación de verano. En este caso se asume una temperatura de confort 18 °C. Dichos valores fueron cal-

Tabla 5: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	4,98	3,88	4,50	4,22	-0,61	-0,33
2	6,69	5,68	5,62	5,30	0,06	0,37
3	6,99	6,17	6,34	6,00	-0,17	0,17
4	10,18	8,37	7,94	7,52	0,43	0,84
5	9,76	8,90	8,86	8,45	0,04	0,45
6	9,30	8,90	9,46	9,02	-0,57	-0,12
7	11,02	9,15	9,35	8,93	-0,20	0,22
8	7,93	4,96	4,93	4,68	0,03	0,28
9	9,95	7,45	7,00	6,84	0,45	0,61
Promedio	8,53	7,05	7,11	6,77	-0,06	0,28

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Promedio de temperaturas horarias por termofase en días típicos de INVIERNO. Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2.

	T (°C) exterior	T (°C) interior			Δt interior = CT-CV		$\Sigma \Delta t_{CT}$ (°C)	$\Sigma \Delta t_{CV1}$ (°C)	$\Sigma \Delta t_{CV2}$ (°C)
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2			
Calentamiento	13,77	5,97	6,47	6,22	-0,51	-0,25	1167,28	1117,93	1142,64
Enfriamiento	5,74	7,53	7,58	7,22	-0,04	0,31	1999,15	1990,64	2058,67
					Σ		3166,43	3108,57	3201,31

Fuente : Elaboración propia

culados para los 12 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura hora a hora permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT- (Tabla 6). Los resultados muestran leves diferencias de temperatura entre CV1 y CV2 en relación al testigo, para el calentamiento y el enfriamiento de - 0,25 y 0,36; respectivamente- (Tabla 6).

El consumo energético, respecto al testigo (CT), muestra un consumo del 96% para el tratamiento CV1 y del 98% para CV2 para el periodo de calentamiento. Para el periodo de enfriamiento -al igual que en el periodo de calentamiento- se puede observar que el box CV1 (100%) presenta menor eficiencia que el box CV2 (103%). El consumo energético diferencial por especie y por periodo podría explicarse -como se mencionó en la estación de verano- por la arquitectura de ambas especies en las cubiertas vegetadas. El tratamiento CV1, vegetado con *Aptenia cordifolia*, permite la penetración de un flujo de calor hacia el interior, logrando mayor eficiencia de día que CV2 y no demuestra un comportamiento diferencial al tratamiento testigo durante la noche (periodo de enfriamiento), por lo cual su beneficio se registraría sólo durante el día. En cambio para CV2 se observa un ahorro energético menor a CV1 durante ambas termofases y durante la noche un consumo energético superior al del box CT (Figura 8). El comportamiento termo-energético de CV2 se explicaría por las características de la especie *Sedum spectabile*, la cual presenta su etapa de mayor crecimiento

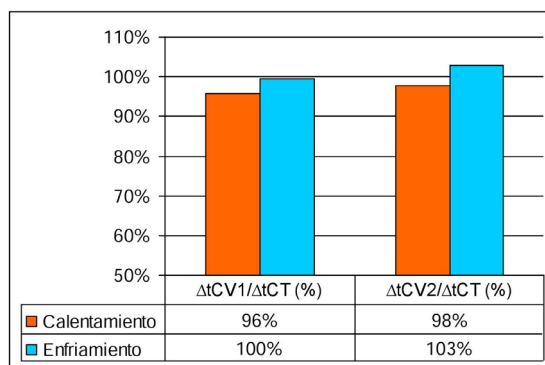
y desarrollo en primavera-verano y una etapa de senescencia y muerte de la parte aérea o dosel en otoño-invierno. La escasa cobertura -19,70 %- de esta especie en la estación invernal deja de manifiesto que al disponer la cubierta de mayor cantidad de suelo desnudo permitiría mayor intercambio radiativo y convectivo hacia la bóveda celeste, facilitando el enfriamiento nocturno y por ende, enfriando el interior aún más que una cubierta vegetada con mayor cobertura -CV1-.

El consumo energético de CV2 muestra un comportamiento conservativo debido al rol como aislante térmico de la cubierta vegetada durante la termofase de calentamiento en comparación al box testigo con un ahorro de energía de un 2%. Pero durante la noche -termofase de enfriamiento- el consumo energético de CV2 es superior en 3% al box CT. Esto último podría deberse a un balance térmico desfavorable para el comportamiento conservativo en el periodo de enfriamiento debido a la ausencia de la protección que lograría una mayor cobertura vegetal y a la mayor masa térmica -respecto al box CT- aportada principalmente por el sustrato que funcionaría como enfriador del espacio interior contrarrestando el beneficio del periodo de calentamiento.

Conclusiones

De los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales se puede concluir que en la estación de verano, el uso de cubiertas vegetadas permite amortiguar las temperaturas en espacios interiores, con un consecuente ahorro energético. Las cubiertas vegetadas disminuyen la amplitud térmica interior alrededor de 7 °C y la temperatura máxima alrededor de 5 °C. Además, la temperatura media interior fue de 1,5 °C menor respecto a un techo tradicional sin vegetar. La disminución de la temperatura en espacios interiores contribuye a optimizar los consumos de energía. Diferencias en la temperatura interior del orden de 1,5-1,6 °C generan ahorros de energía para refrigeración del 30% al 35%. El ahorro es función de la termofase del día -calentamiento o enfriamiento- y de la especie vegetal que se utilice en la cubierta. Las

Figura 8. Consumo energético (%) de CV1 y CV2 relativo a CT en INVIERNO



Fuente : Elaboración propia

termofases han sido analizadas en este trabajo en función de diferencias de temperatura, no en términos de la contribución relativa de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor a la producción de tal efecto. En etapas futuras se pretende discernir el aporte de cada mecanismo de transferencia de calor al efecto global que se presenta en este trabajo.

La cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* demostró mejorar el confort térmico interior disminuyendo las temperaturas máximas y medias respecto a una cubierta tradicional. El aporte al confort térmico producto de esta cubierta vegetada se traduce en un ahorro energético del 35% de la energía que se debería destinar a refrigeración en el periodo de calentamiento y del 31% en el periodo de enfriamiento. Vegetar la cubierta con la especie *Sedum spectabile* permite un menor ahorro de energía durante el enfriamiento -30%- con respecto a *Aptenia cordifolia*, si bien produce un ahorro significativo respecto a la cubierta tradicional sin vegetar. En cambio, en el periodo de enfriamiento, *Sedum spectabile*, presenta mejor comportamiento termo-energético que *Aptenia cordifolia*, logrando un ahorro del 35%. Estos resultados muestran la importancia de la selección de especies con el fin de optimizar el comportamiento termo-energético, según el uso, el diseño y la materialidad de la edificación a intervenir.

En la estación de invierno los beneficios son menores a los del verano y el comportamiento termo-energético depende de la especie utilizada. Con cubiertas vegetadas hubo una disminución de 8 °C en la amplitud térmica y un aumento de la temperatura mínima interior de al menos 2 °C. La temperatura media interior es similar en esta estación en los tres box de ensayo, ya sea con o sin cubierta vegetada. La cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* presenta mayor ahorro energético para calefacción -4%- en el periodo de calentamiento, pero en el periodo de enfriamiento se comporta -en términos energéticos- del mismo modo que una cubierta tradicional sin vegetar. El comportamiento térmico de la cubierta con *Sedum spectabile* logra un ahorro de energía para calefacción en el periodo de calentamiento de 2% pero en el periodo de enfriamiento consume en su interior un 3% más que

un espacio con cubierta tradicional. Lo cual, al igual que en verano, destaca la importancia del diseño de la tecnología con el fin de optimizar el comportamiento interior.

A nivel internacional se encuentran numerosos trabajos científicos que relacionan el de comportamiento térmico y energético de las cubiertas vegetadas, principalmente para zonas tropicales o templadas donde no es necesario realizar aportes artificiales de agua. La contribución de este trabajo se enmarca en el contexto árido del sitio de estudio y en las dificultades de seleccionar adecuadamente las especies a utilizar, de modo que respondan apropiadamente a los condicionantes hídricos del lugar, en concordancia con su efecto positivo en términos termo-energéticos. El efecto estacional puede ser significativamente diferente con el empleo de la misma especie, esto le da un valor agregado al estudio local de las diferentes especies y sus combinaciones en distintas épocas del año.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICET) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) la financiación recibida para el desarrollo de esta investigación. Como también a las empresas SIKA ARGENTINA y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS S.A. por sus contribuciones al desarrollo de los ensayos experimentales.

Bibliografía

- Alchapar, N. & Correa E. (2013). Modificación de la reflectancia solar en la envolvente edilicia y su impacto sobre las temperaturas interiores. *Revista AVERMA*. 1, pp. 05. 69-05.78.
- Alexandri, E. & Jones, P. (2006). Temperature decreases in as urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. *Building and Environment - Science Direct - Elsevier Ltd*
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buil-denv.2006.10.055>
- Cárdenas, G. J. (2011). Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario*. 32-36.
Disponible en: <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20120228122933000000.pdf>
- Dunnett, N. & Kingsbury, N. (2004). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press Inc, Oregon.
- Erbs D.G. (1987). Degree Day for Variable Base Temperatures. *Proceedings of International Solar Energy Society (ISES)*. (6), pp. 387-391. Ed. J. Hages and W. Kollar.
- Flores Asin, J. E., Martinez, C. F. & Cantón, M. A. (2013). Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM). *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. 1, pp. 05.115-05.120, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5
- Flores Asin, J. E., Martinez, C. F.; Cantón, M. A. & Correa E. N. (2015). Impacto de cubiertas vegetadas en el ahorro energético del parque edilicio del área metropolitana de Mendoza (AMM). *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. 3, pp. 05.81-05.89, 2015. ISBN 978-987-29873-0-5
- La Roche, P. (2009). Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. *PLEA 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec, Canada 22-24 June 2009*.
- Pincetl, S. (2012). Nature, Urban Development and Sustainability – What New Elements are Needed for a More Comprehensive Understanding? *Cities: Current Research on Cities*, 29:S32-S37 *Science Direct - Elsevier Ltd*
Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2012.06.009>
- Qiu G., Li H., Zhang Q., Chen W., Liang X. & Li X. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, nº 12, pp. 1307-1315. *Science Direct - Elsevier Ltd*. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- Rosenfeld E., San Juan G, Discoli C, Martini I, Ferreyro C. & Barbero D. (2007) Ahorro de energía en el sector residencial. Su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI). *Revista AVERMA*. 11: 07.31-07.38.
- Teemusk A, Mander U. (2010). Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering* 2010; 36:91-105. *Science Direct - Elsevier Ltd*.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.09.009>
- Wong, N. H.; Tan A. Y.; Tan, P. Y; Wong, N.C. (2009). Energy Simulation of Vertical Greenery Systems. *Energy and Buildings* v.41, n.12, p.1401-1408. *Science Direct - Elsevier Ltd*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.010>